

企業通信網における Hybrid 網構成決定のための数理モデル

杉野 隆

1. はじめに

通信ネットワークはそのサービス形態により、公衆通信網 (Public 網) と企業通信網 (Private 網) に大別される。Public 網は、NTT の加入電話網のような従量制の通信ネットワークのことをいい、電話、パケット交換などの通信サービスを実現するために、多数の交換機と伝送路から構成される大規模なネットワークとなっている。Private 網は、コモンキャリアから専用線を借り、構内交換機 (PBX)、パケット交換機やルータなどの通信設備を自営で設置して、社内内線電話やコンピュータネットワークといった企業独自の通信サービスを実現する通信ネットワークである。従来 Public 網と Private 網は相対立する通信サービスであったが、両者を積極的に組み合わせた Hybrid 網を構築すれば、よりコストパフォーマンスのよい企業通信網が実現できる。この場合、Public 網は Private 網からあふれた呼を処理するために利用される (図 1)。

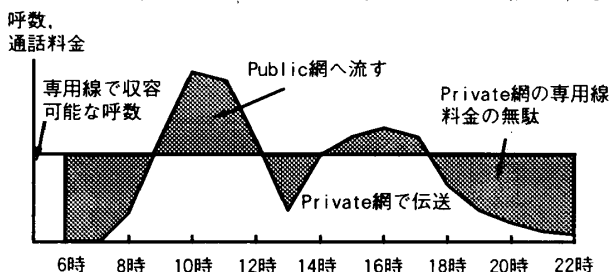


図 1 Hybrid 網の概念

これまでの企業通信網では音声系トラフィックがデータ系トラフィックを大きく上回っており、従来の Private 網の設計は、音声系トラフィックをもとに、専用線のみで構築することを大前提として成立していた。そのトポロジ決定のための主な従来設計手法については、渡辺・大前による研究[3]にまとめられている。専用線でのみ構成してきた理由としては、次の 2 点が考えられる。

a. 音声系通信においては Public 網と Private 網を相互

すぎの たかし 新日鉄情報通信システム (株)
〒104 中央区新川 2-20-15
(株)シリウス 〒106 港区六本木 3-5-27
受付 96.7.3 採択 96.12.27

接続する公専等接続が制度的に認められていなかった。
b. Public 網の通信料金の遠近格差が大きく、全国に多数の事業所をもつ企業にとっては、Private 網の有利性を疑う余地がなかった。

しかし、通信規制緩和、通信料金低廉化により、現在では上記の理由がほぼ崩れつつある (公専公接続も 96 年 10 月に解禁となった)。従って、Public 網をも取り込んだ新しいネットワーク設計手法によってさらにコスト削減をはかれる可能性がでてきた。特に、今後企業通信網がセルリレー交換方式に発展し、Public 網に広帯域 ISDN が利用可能になるとともにシームレスネットワークを構成するようになると、まさに Hybrid 網が前提となろう。

近年の通信自由化、通信事業者間の競争激化にともない、通信サービスは相当程度に多様化/高度化してきた。日本電信電話(株)が公表しているように西暦 2000 年に 3 分 100 円といった遠近格差の小さい公衆通信料金が実現すると、Public 網に対抗して Private 網を運営し続けることは困難になる可能性がある[1]。本研究は、その対策として考えられる Hybrid 網の最適設計手法として、リンクごとの最適性を狙ったリンクモデルと全リンクを対象とした線形計画モデルを組み合わせた新しい網構成決定法を提案し、その数値例について検証を行ったものである。

本論文では、音声系ネットワークを対象を絞って検討するが、ここで紹介する方法論はパケット交換やフレームリレーといった他の通信方式に対しても適用可能である。

2. Hybrid 網構成決定のための数理モデル

2.1 リンクモデル

(1) モデルの概要

トラフィックは、発アドレス (発ノード) から着アドレス (着ノード) までの事業所間 (エンドツーエンド) の呼として発生しており、これらは OD (Origin-Destination) 表として整理される。従来手法では、OD 間のトラフィックをネットワークトポロジに沿ってリ

リンクごとのトラフィックとして集計し、専用線の必要回線数をピーク時トラフィックのアーラン数と呼損率をパラメータとして、即時式完全群負荷表（アーラン呼損率表）にもとづいて算出する。ここに定義するリンクモデルは、Hybrid 網における各専用線リンクの必要回線数を求めるためのモデルであり、従来の Private 網設計手法以下に回線数を絞ることを目的としている。各リンクの発ノード、着ノードはそれぞれの事業所内の PBX に收容されており、PBX で着アドレス（電話番号）を調べ、自ノード内に終端させる（自事業所の内線電話に接続する）か次の専用線リンクを通して隣接する PBX に中継する。専用線リンクの回線数は固定されているため、この回線数を超えるトラフィックは Public 網に回される（図 2）。

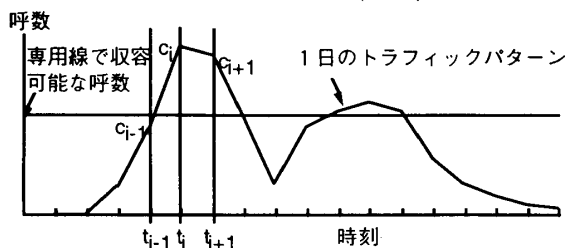


図 2 Hybrid 網のモデル化—リンクモデル

(2) 所要回線数の算出方法

1日のトラフィック変動が図2のように与えられたとする。以下の記号を使用する。

i : 1日 24 時間中の各時間帯に対応する添え字 ($i=0 \sim 23$)。

k : 複数の専用線（リンク）から構成される Private 網における各リンクに対応する添え字。

$Erl[N, B]$: 音声回線数 N , 呼損率 B の場合に運びうる最大のトラフィック容量（呼量）であり、一般には即時式完全群負荷表から算出される（アーラン）。

h : 各呼の平均保留時間（秒/呼）。

c_{ki} : リンク k において時間帯 i に発生する総呼数。

$D[N, k]$: 音声回線 N 回線からなるリンク k （高速デジタル専用線）の月額使用料金（千円/月）。

O_k : リンク k の運用に要する運用経費（千円/月）。設備費用、運用人件費など $D[N, k]$ 以外の費用からなる。

t_{ki} : リンク k において時間帯 i に 1 度数（10 円）でかけられる通話時間（秒）であり、NTT などのコモンキャリアの料金表に従い決定される。

D_m : 1 か月の実働日数（日/月）。

呼量の定義から、音声回線 N 回線で運べる呼数 d_N は、

$$d_N = \frac{Erl[N, B] \times 3600}{h} \quad (\text{呼})$$

となる。また、リンク k において時間帯 i に Public 網に回る呼数は、

$$\max \{0, c_{ki} - d_N\} \quad (\text{呼})$$

となる。このトラフィックにより発生する 1 か月あたりの公衆通信料金は、これらをすべてのリンク、時間帯に対して加えることによって、次のように表わされる。

$$\sum_{k,i} \frac{10}{1000} \max \{0, c_{ki} - d_N\} \frac{h}{t_{ki}} D_m \quad (\text{千円/月})$$

したがって、Hybrid 網における総通信費用 z は、専用線使用料、公衆通信料金と運用経費の合計として、次式のように表わされる。

$$z = \sum_k \{ D[N, k] + \sum_i 0.01 \max \{0, c_{ki} - d_N\} \frac{h}{t_{ki}} D_m + O_k \} \quad (\text{千円/月})$$

上の z を最小にする音声回線数 N_{min} は、当該ネットワークの総通信費用を最小にすることになる。

(2) 解法と数値例

Private 網における各リンクの回線数 N をパラメータとして専用線使用料、公衆通信料金を算出するプログラムを C 言語で作成した。 N を従来設計手法で求めた回線数から 0 回線まで変動させ、総通信費用が最小となる値 N_{min} を求める。例えば、後に示す数値例 3 における東京～大阪間のリンクの総通信費用について計算すると、図 3 のような数値結果が得られる。

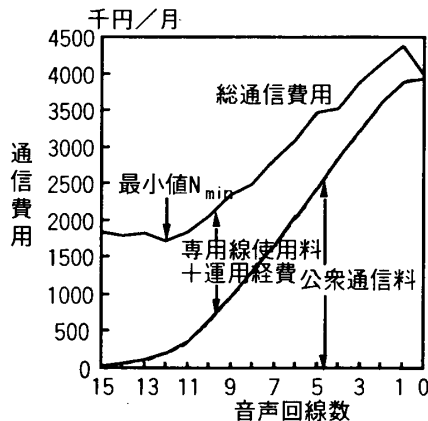


図 3 リンクモデルにおける計算結果の一例

2.2 線形計画モデル

(1) リンクモデルの問題点

通信は、発アドレスから着アドレスまでのエンドツーエンドで始めて完結する。リンクモデルはエンドツーエンドの通信を構成するリンク群を個々のリンク（区間）に分割して、Private 網に必要な回線数を算出するものである。しかし、この方式では、各ノードにおける中継処理のための呼制御処理負荷の大幅な増加が予想される。したがって、個々のリンクで Public 網への迂回を制御するのではなく、エンドツーエンドベースで発アドレスから着アドレスへ直接 Public 網に迂回させるほうが望ましい。この考えに基づき、線形計画モデルでは、リンクモデルで算出された各リ

リンクの回線数を固定して各 OD トラフィックのリンクへの最適割付けを行う。

(2) 線形計画モデルの概要

リンクモデルで使用した記号に加えて次の記号を用いる。

d_k : リンク k において 1 時間内に専用線が運べる最大呼数。

$c_{i,pq}$: 時間帯 i にノード p と q を結ぶ経路で発生するエンドツーエンドの呼数。

$P_{k,pq} \in P_k$: リンク k を通過するすべてのノード間の経路集合 P_k のうち任意のノード p と q を結ぶ経路を $P_{k,pq}$ とする。ここではループを含まないトポロジを対象としているため、経路はあればユニークに存在する。

$t_{i,pq}$: 時間帯 i に経路 pq 間で 1 度数でかけられる通話時間 (単位: 秒)

i) 決定変数

$x_{i,pq}$: 時間帯 i にノード p と q を結ぶ経路で発生するエンドツーエンドの呼数の内専用線で運ばれる呼数 (≥ 0)

$y_{i,pq}$: 時間帯 i にノード p と q を結ぶ経路で発生するエンドツーエンドの呼数の内 Public 網で運ばれる呼数 (≥ 0)

図 4 に線形計画モデルで用いられる $x_{i,pq}$, $y_{i,pq}$ の概念を示す。後に述べる理由により、図 4 では添え字 i を省略した。

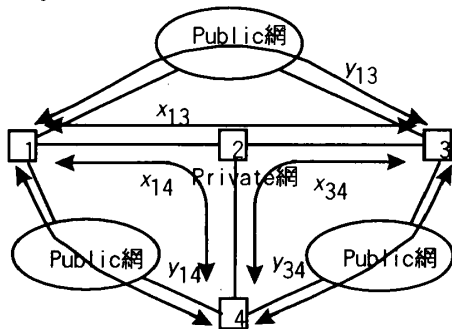


図 4 Hybrid 網のモデル化—線形計画モデル

ii) 制約条件

a. リンク容量条件 時間帯 i に、リンク k は最大 d_k 呼しか運べない。リンク k を通過するすべてのエンドツーエンドの経路 $P_{k,pq}$ で発生する呼の合計が d_k 以下でなければならないことを意味する。

$$\sum_{P_{k,pq} \in P_k} x_{i,pq} \leq d_k, \quad i=0 \sim 23 \quad (1)$$

b. ノード間トラフィック充足条件 時間帯 i において、ノード p と q を結ぶ経路で発生する呼数は Private 網と Public 網によって過不足なく運ばれる必要がある。

$$x_{i,pq} + y_{i,pq} = c_{i,pq}, \quad i=0 \sim 23 \quad (2)$$

iii) 目的関数

Public 網にあふれた呼にもとづく公衆通信料金の

合計を最小にすることを目的とする。

$$\text{Minimize } \sum_{pq} \sum_{i=0}^{23} 0.01 \left(\frac{h}{t_{i,pq}} \right) y_{i,pq} D_m \quad (\text{千円/月}) \quad (3)$$

上の線形計画モデルの制約式行列の係数は全て 0 又は 1 である。特に(1)式の係数行列は、各ノード間のトポロジを表わす接続行列となっている。

(3) 前提条件と解法

(3)式では、全日の公衆通信料金を算出するために時間帯 i に関する総和を最小化しているが、リンクモデルにより最繁忙時間帯に対して決定された回線数を全日に対して適用することとし、以下では i を省略し最繁忙時間帯を対象とする。単体法による線形計画法のプログラムは、H.P. キュンチら[2]に記述されている ALGOL によるプログラムを C 言語に書き換えて作成した。

3. 数理モデルの前提と入力データ

(1) トラフィックパターン

業務用通信においては、午前中の 10 時前後の 1 時間に 1 日の総トラフィックの 15~20% が集中するといわれ、この値を最繁忙集中率という。トラフィックは、週内、月内、年内に発生する周期的な変動と長期的な増加または減少といった傾向変動を有する。各時間帯ごとの日内変動の平均値とその最繁忙集中率の測定結果を図 5 に示す。各ノードあるいはノード間ごとに業務上の特性に応じてパターンの違いが見られるが、ここでは簡便のために、どのノード間でも同一最繁忙時間帯に同一集中率になるものとした。

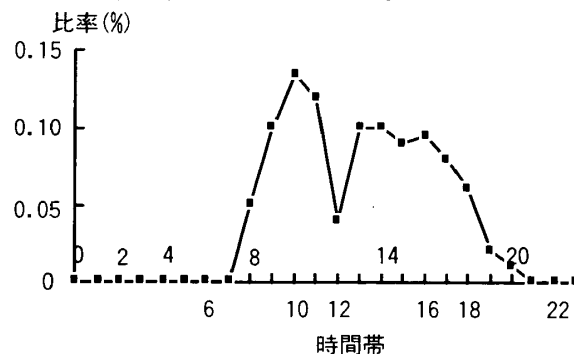


図 5 トラフィックパターン (日内変動)

(2) 専用線料金体系

高速デジタル専用線の回線速度は、64kb/s~6Mb/s までを 12 段階に分けて提供されている。音声回線を専用線内に収容するためには、必要回線数に 32kb/s を乗じた速度合計を下らない最小の回線速度の高速デジタル専用線を選択することになる。図 6 に、一例として、通信速度 256kb/s の専用線の料金体系を示す。また、回線接続装置 (DSU) は専用線料金に含める。

(3) 公衆通信料金体系

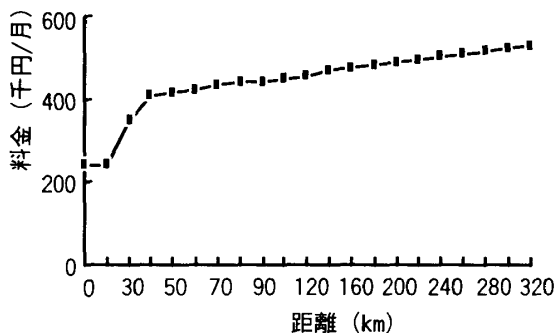


図6 高速デジタル専用線料金体系 (256kb/s)

1996年3月に、公衆電話の最遠区間料金が3分180円から140円に大幅に値下げされた。また、将来(2000年)には3分100円になるとともに、市内料金が3分20円に値上げされるといわれる。ここでは、その中間の距離区分に対して適当に料金を想定したものを新しい料金体系として想定した(図7)。

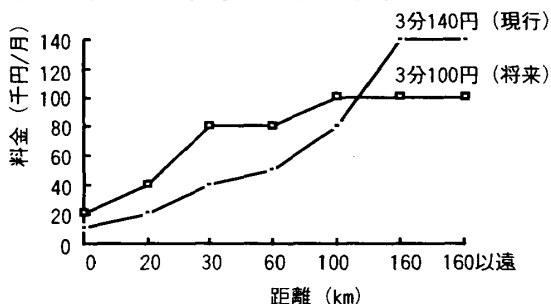


図7 公衆通信料金体系 (現行と将来想定)

また、公衆通信サービスには回線当たり月額固定の基本料金があるが、金額が小さいことと、企業外通信と共用されることから、Hybrid網に与える影響は小さい。ここでは、基本料金を無視した。

(4) ネットワーク運用経費

ネットワーク関連機器費用、運用人件費、用役費、スペース代などから構成される。ネットワーク関連機器には、PBX、多重化装置、ネットワーク管理システム(NMS)などがある。

PBXの規模は事業所の勤務人員数にはほぼ比例し、それに応じて他の事業所との間の発着トラフィック、すなわち専用線の音声回線数(後述)が決定される。多数の音声回線は、一般には高速デジタル専用線に多重化されて他の事業所と接続されるが、PBXと多重化装置のインターフェースになる機器が多重化装置である。また、企業通信網全体の運用管理を支援するのがNMSであり、管理センタに集中管理装置、各事業所にデータ収集・表示・制御装置が設置される。NMSの規模は、企業通信網の事業所数、管理対象通信機器数に依存する。結局運用経費は、基本的に事業所数と各事業所に発着するトラフィック(音声回線数)に依存することになる。なお、ここでは事業所間を結ぶ社内内線電話サービス(トルダイヤルサービス)のみを対象にし

ており、各事業所内に閉じた内線電話サービス、他社との通信である社外電話サービスは対象外とした。したがって、PBX費用においては中継交換機能のみがトルダイヤルシステムの対象となりうるが、金額的には大きなウェイトを占めてはいないため、ここでは無視した。

4. 数値例

4.1 数値例の概要

(1) ネットワーク構成

図8のように5事業所からなる中規模程度の企業通信網を設定する。事業所相互間の年間平均の1日の総

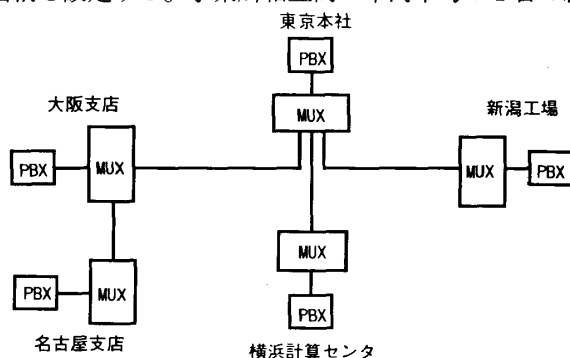


図8 ネットワーク構成図

トラフィックをOD表として表1に示す。ここでは、対地ごとの両方向のトラフィックを合計して上三角行列にまとめている。()内は、最繁時(10時台)における各エンドツーエンドの呼数 c_{pq} である。また、 OD_n ($n=1\sim 10$)は事業所間のエンドツーエンドのトラフィックの番号を示す。

表1 ケーススタディにおけるOD表 単位 呼

	大阪	名古屋	横浜	新潟
東京	1164(157.1) OD1	307(41.4) OD2	168(22.7) OD3	653(88.2) OD4
大阪	-	320(43.2) OD5	36(4.9) OD6	390(52.7) OD7
名古屋	-	-	12(1.6) OD8	236(31.9) OD9
横浜	-	-	-	876(118.3) OD10

各リンクごとのトラフィックは表2のようになる。

表2 リンクごとのトラフィック 単位 呼

	東京-大阪	大阪-名古屋	東京-新潟	東京-横浜
全日呼	2,145	875	1,092	2,155
最繁時呼数	289.6	118.1	147.4	290.9

(2) パラメータの設定

Public網通信料金の値下げの企業通信網への影響を調べるために、各パラメータに対して次の数値を与え、複数のケースを設定する。

- トラフィックパターン 図5参照。
- 音声回線の収容方法 音声回線を高速デジタル専用線に収容する方法として現在最も一般的なのは、

ADPCMによる32kb/s音声圧縮方式であり、この場合高速デジタル専用線の1チャンネル(64kb/s)に音声回線2回線を収容できる。ここでは、ADPCM方式を採用する。一方、Public網も、ISDNを利用すれば音声圧縮し多重化することも考えられるが、ここではBチャンネル1本に音声1回線を収容するものとした。

c. 専用線料金体系 1998年4月改定予定の料金体系を採用する。

d. Public網料金体系

ケース1：現行体系(1996年3月改定)

ケース2：3分100円体系(距離区分、時間区分は現行体系と同じ)

e. 運用経費 各事業所ごとの通信機器、運用人件費他から構成される。

ケースA：

通信機器費 固定費 200~400千円/月、
 比例費 25千円/チャンネル・月
 運用人件費他 0.4~0.8千円/月(事業所規模による)

ケースB：

通信機器費 固定費 20千円/月、
 比例費 14千円/音声回線・月
 運用人件費他 0.4~0.8千円/月(事業所規模による)

f. その他のパラメータ 呼損率(B)は、0.1、平均保留時間(h)は151秒、1か月の日数(Dm)は22日とした。

(3) 数値例の設定

ケース1/2, ケースA/Bを組み合わせて表3の3つの数値例を設定した。

表3 数値例の設定

	ケースA	ケース
ケース1	数値例1	数値例2
ケース2	-	数値例3

4.2 数値例の結果

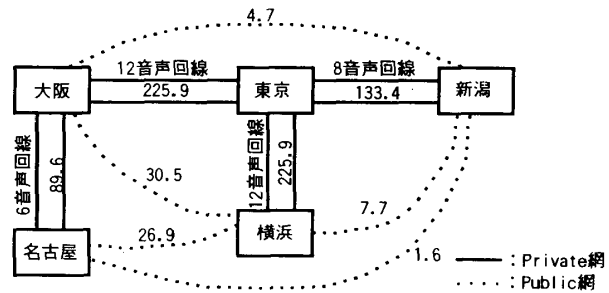
リンクモデルによる回線削減効果は次の通りである。各数値例ともに結果は同じである。

表4 リンクモデルによる回線数削減

	東京-大阪	大阪-名古屋	東京-新潟	東京-横浜
従来手法	15音声回線 (512kb/s)	8音声回線 (256kb/s)	9音声回線 (364kb/s)	15音声回線 (512kb/s)
リンクモデル	12音声回線 (384kb/s)	6音声回線 (192kb/s)	8音声回線 (256kb/s)	12音声回線 (384kb/s)

注()内は、実際に使用する高速デジタル専用線の回線速度。

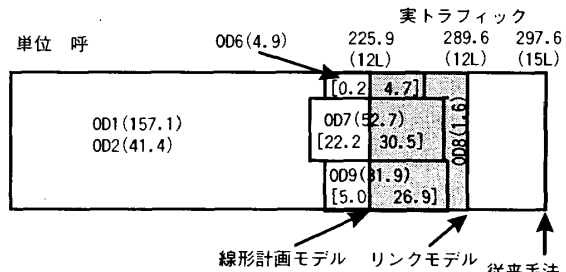
さらに線形計画モデルによりコスト削減を目指した結果を表5に示す。表5の()内に全てPublic網で構成した場合の通信費用を1とした場合のコスト削減効果を示す。数値例1から2の間での線形計画モデルによるコスト削減効果が数値例2から数値例3の間での



注 数字は、それぞれPrivate網内及びPublic網に回った音声呼数(呼最繁忙1時間)を示す。数値は小数第2位で四捨五入した。

図9 線形計画モデルの結果(数値例3)

それより大きいのは、運用経費の設定をケースAからケースBに変えたことによるものである。運用経費の水準は、Private網あるいはHybrid網の運営に大きく影響を与える。数値例3の線形計画モデルの費用内訳は、専用線使用料2,012千円/月、公衆通信料金206千円/月、運用経費2,814千円/月である。数値例3の結果について、図9に各専用線の音声回線数、Private網とPublic網のリンク別呼数を示す。図10に、東京



注 ()内はエンドツーエンドの呼数, []内はPrivate網、Public網への割付け結果を示す。008はPublic網のみ。L: 音声回線数

図10 線形計画モデルにおけるトラフィックの割付の例
 一大阪間のリンクにおいて各エンドツーエンドのトラフィックを専用線とPublic網に割り付けた結果を示す。東京~大阪間のリンクにはピーク時に289.6呼が流れている。呼量は12.147アーランであり、従来手法では15音声回線を必要とする。逆に15音声回線では297.6呼まで運べる。リンクモデルを適用すると、専用線は12回線で済むことになる。さらに線形計画モデルを適用すると、専用線の回線数は変わらないが、

表5 ケーススタディ結果の費用削減 単位 千円/月

	数値例1	数値例2	数値例3	
運用経費	4,950	2,814	2,814	
Public網のみ	9,371 (1.0)	9,371 (1.0)	7,421 (1.0)	
Private網のみ	7,435 (0.79)	5,641 (0.60)	5,641 (0.60)	
Hybrid網	リンクモデル	7,258 (0.77)	5,289 (0.56)	5,253 (0.71)
	線形計画モデル	7,236 (0.77)	5,111 (0.55)	5,032 (0.68)

Public網に迂回する呼があるため、専用線に流れる呼は225.9呼にまで減少する。OD1,2のトラフィックはすべて専用線に割り付けられている。OD6には4.9呼

流れるが、その内 0.2 呼が専用線に、4.7 呼が Public 網に迂回する。OD7,9 も同様である。一方、OD8 は 1.6 呼すべてが Public 網に流れる。

4.3 コスト最小性の確認

本提案により設計された Hybrid 網がコスト最小を実現できているかどうかを確認するために、ここでは、専用線音声回線数をリンクモデルの結果の数値からさらに 1 回線削減した場合に通信費用が増大するかどうかを計算することによって、コスト最小性を調べてみた。当該ネットワークを構成するどのリンクで 1 回線削減してみても公衆通信料金が增大し、Hybrid 網の通信費用は必ず増加することが確認できた(表 6)。少なくともこの事例においては、線形計画モデルによるネットワーク構成がコスト最小を実現しているといえる。

表 6 線形計画モデルのコスト最小性の確認

単位 千円/月

	数値例 3	数値例 3 に対し各リンクで 1 回線削減				
		リンク 1	リンク 2	リンク 3	リンク 4	リンク 5
Hybrid 網費用	5,032	5,100	5,113	5,105	5,226	5,265

5. まとめと今後の課題

5.1 まとめ

本論文では、従来設計手法に対し、リンクモデルと線形計画モデルを組み合わせたネットワーク設計手法を提案した。リンクモデルでは、個々のリンクに注目して、専用線使用料、公衆通信料金の総合計が最小となるように従来手法によってリンクの回線数を決定した。さらに線形計画モデルでは、エンドツーエンドのあふれ呼の公衆通信料金合計を最小化し、ネットワークのさらなる効率化を図った。

3つの数値例について実際に本提案の手法を適用し、従来手法より音声回線数が 1~3 は削減され、公衆通信料金、運用経費も含めた通信費用は Private 網のみのネットワークよりも低減できることを確認した。また得られた音声回線数を変動させることにより、この事例ではコスト最小が実現できていることを確認した。

5.2 今後の課題

(1) 数値例の各パラメータの変動に対する本手法の頑強性の確認

トラフィックパターン、通信料金体系などには、今後種々のバリエーション(例えば極端な例として全国一律料金)がもたらされることが予想される。それぞれの場合にも有効なモデルへの発展が必要である。

また事業所ごとのトラフィックの大幅に偏った変動

に対しては、ネットワークトポロジの見直しが必要になる可能性がある。本手法と[3]に提案されている手法を組み合わせた設計手法が有効かもしれない。今後検討したい。

(2) コンピュータネットワークへのモデル適用の可能性

コンピュータネットワークのバックボーンは、ルータによる経路制御を活用したものが増加してきている。これらのルータは専用線の障害発生時の ISDN へのバックアップ切替えばかりでなく、専用線の伝送容量を超えるトラフィックの発生時に、あふれトラフィックを ISDN に流す機能をもったものもある。本モデルは、このようなルータ間ネットワークにも適用できる。

(3) ネットワークがループを含む場合の解法

本論文で扱ったトポロジは、ループを含んでいない。ループを含むネットワークにおいてはリンクモデルにフロー問題を含める必要があり、今後検討したい。

(4) 仮想私設網(VPN)との経済性比較

Public 網上に論理的(ソフト的)に Private 網を構築する VPN サービスが 1994 年から提供されている。この VPN サービスには最近大口割引制が導入され、大規模な Private 網をすべて Public 網のみで構築した場合よりも、(事業者によって異なるが) 20%程度安く実現できる可能性がでてきた。本提案による Hybrid 網との経済性比較は、実務的な課題として個々のケースにおいて必要になるとと思われる。

6. 謝辞

本論文の作成に当たっては、大山達雄氏(埼玉大)、査読者各氏に貴重なコメントをいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] Chiara D., Gilardi C., Lavoro E., Sternini C., Corporate Telecommunication Networks: New Trends and Main Integration Issues, Telecommunications, 26-29 March 1995
- [2] キュンチ, チャッハ, チェンダー(刀根薫監訳), 電子計算機のための数理計画法, 日科技連出版社, 1969
- [3] 渡辺・大前, 企業内通信網のトポロジーに関する構成法, 電子情報通信学会論文誌, (B-I), J74-B-I, 2, pp. 107-115(1991-02)
- [4] 杉野, Private 網と Public 網の経済性評価と問題点, 科学研究費補助金研究成果報告書「高度技術社会における情報ネットワーク技術の展望と評価」, 298-306, 1995